



DOI: 10.12086/oe.2018.170647

## 自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用

芮道满<sup>1,2</sup>, 刘超<sup>1,2\*</sup>, 陈莫<sup>1,2,3</sup>, 鲜浩<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 综述了自适应光学技术在星地激光通信地面站上应用的最新进展。针对星地链路中湍流效应导致的相干度退化和可用度降低的问题, 自适应光学技术成为美国和欧洲等国正在研制的中继卫星至地光通信系统解决上述问题的主导手段。这些项目计划开展的自适应光学技术、白天和夜晚多地面站接收技术和相干通信技术等关键技术验证表明, 星地激光通信正向高速相干和全天时高可用度的工程化推进。国内成功进行了多次星地光通信试验, 高可用度的相干激光通信技术的验证正在积极开展, 自适应光学技术已应用到多个地面站并取得了较好的初步试验效果, 相关技术进展与国外水平保持一致。

**关键词:** 自适应光学; 激光通信; 地面站**中图分类号:** TN929.1**文献标志码:** A**引用格式:** 芮道满, 刘超, 陈莫, 等. 自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170647

## Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station

Rui Daoman<sup>1,2</sup>, Liu Chao<sup>1,2\*</sup>, Chen Mo<sup>1,2,3</sup>, Xian Hao<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The advance of satellite to ground laser communication station using adaptive optics (AO) is summarized. Adaptive optics is the dominant technology to solve the atmosphere induced coherence degradation and availability reduction in the USA and Europe researching relay satellites. Key technologies, such as adaptive optics, multi-ground station receiving in day and night, and coherent communication are planned to test in these projects. It indicates that the satellite to ground laser communication is advancing to the engineering application with high data rate coherence and round-the-clock high availability. Several satellite to ground laser communication experiments have been successfully carried out in domestic, and the high availability coherent laser communication test is in progress. Adaptive optics technology has been applied in several ground stations and pretty results are obtained in the preliminary experiment. The related technology progress keeps in the same level with the foreign countries.

**Keywords:** adaptive optics; laser communication; ground station**Citation:** Rui D M, Liu C, Chen M, *et al.* Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170647

收稿日期: 2017-11-26; 收到修改稿日期: 2018-02-05

基金项目: 中国科学院创新基金资助项目(CXJJ-16S021)

作者简介: 芮道满(1985-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事自由空间激光通信自适应光学技术的研究。E-mail: dmrui@126.com

通信作者: 刘超(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事自由空间激光通信技术的研究。E-mail: liuchao678@163.com

## 1 引言

随着超光谱成像和合成孔径雷达在卫星平台上的应用,产生的数据量大大增加,要求空间通信的带宽达到 10 Gb/s 量级以上,这将突破微波通信系统的理论带宽上限。空间激光通信系统以激光作为载波传输信息的技术,其潜在的通信带宽可以达到 100 Gb/s 量级以上,具有保密性好、体积小、重量轻、功耗低、抗干扰能力强以及不受无线电频率管制等优点,因此,自由空间激光通信为解决微波带宽瓶颈提供了有效手段<sup>[1-2]</sup>。以美国、欧洲为代表的发达国家已开展了一系列星间和星地激光通信演示系统,近年来开展的典型星地项目包括:2013 年美国开展了 40 万千米链路的月球至地双向激光通信,上下行速率分别为 20 Mb/s PPM (pulse position modulation)和 622 Mb/s PPM<sup>[3]</sup>,其面向更远距离的深空激光通信项目—火星至地的激光通信正在部署中。2014 年 NASA 进行了国际空间站至地的下行 50 Mb/s 单向激光通信,其通信方式为 Intensity Modulation/Direct Detection (IM/DD),误码率为  $10^{-4}$ <sup>[4]</sup>。面向激光通信空间组网的需求,2019 年美国将开展激光通信中继验证,其指标是实现 45000 km 的 GEO 至地的 2.88 Gb/s DPSK (differential phase shift keying)双向激光链路<sup>[5]</sup>。根据 NASA 下一代(2024 年)光通信中继卫星至地链路规划,其目标是实现下行速率为 100 Gb/s,可用度为 97%<sup>[6]</sup>。欧洲的光通信组网验证项目正在开展中,2015 年 9 月德国成功进行了同步轨道 Alphasat 卫星 LCT 终端与地面站的 1.8 Gb/s BPSK (binary phase shift keying)双向相干通信试验<sup>[7]</sup>。以欧洲空间局(ESA)主导的“全球网”EDRS 项目预计 2020 年完成,其星地指标是实现 GEO 至地的 1.8 Gb/s DPSK 双向激光链路<sup>[8]</sup>。我国也开展了多次卫星至地激光通信验证,2011 年 11 月,哈尔滨工业大学自行研制的光通信终端搭载于 LEO 卫星海洋二号上,和地面站之间建立了光通信链路,上行传输速率为 20 Mb/s,下行传输速率为 504 Mb/s,平均捕获时间小于 5 s,这次实验是我国首次星地激光通信实验<sup>[9]</sup>。2016 年 8 月,由中国科学院上海光学精密机械研究所牵头研制的星地高速相干激光通信实验载荷搭载量子卫星成功发射,其后开展了国内首次在轨相干激光通信试验,在星地链路距离 1000 km 以上、低仰角 20°左右、下行通信速率 5.12 Gb/s 条件下,成功实现了图像传输,图片传输清晰<sup>[10]</sup>。2017 年 8 月,哈尔滨工业大学进行了同步轨道光通信终端与地面 5 Gb/s 的通信试验,三束

信标光、三束信号光、一束接收光,七个光轴同轴度达到微弧度量级<sup>[11]</sup>。

从上述发展可以看出,欧美的近地轨道或同步轨道激光通信多采用 BPSK 或 DPSK 的相干通信模式,而深空通信多采用 PPM 调制的非相干通信模式。光通信正在向高速率高可用度终端、空间组网和深空光通信发展。AO 技术作为解决星地激光链路中大气湍流效应引起的相干度退化和可用度降低的关键技术,国内外研究者在理论和实验方面进行了大量研究<sup>[12-14]</sup>,而将 AO 技术应用于实际星地通信演示系统中尚处在起步阶段,本文综述了国外自适应光学地面站的最新成果,总结了星地光通信 AO 技术面临的新挑战和相关系统中采取的针对性措施,并介绍了我们的多套自适应光学地面站的研究进展。

## 2 国外自适应光学光通信地面站研究现状

### 2.1 美国

#### 2.1.1 近地轨道卫星至地链路

继 2014 年国际空间站至地面的下行 50 Mb/s OOK (on-off keying)单向激光通信后,为发展未来 10 Gb/s~100 Gb/s 带宽星地相干通信技术,2015 年 NASA 喷气推进实验室联合波音公司等单位对 Table mountain 上的 1 m 口径地面站进行了改造,加装了 1000 单元的自适应光学系统,开展了世界首次星地链路自适应光学校正和单模光纤耦合的试验<sup>[15-16]</sup>,其系统原理图如图 1 所示,四路上行信标经中继光路后由主望远镜发射,下行信号光由主望远镜接收,经中继光路和 AO 系统后耦合进入单模光纤,并接入通信端机。通过对下行信号的三级跟踪(包括望远镜机架和两级 FSM)和波前的 AO 校正,克服大气湍流和振动对光束的影响,实现了 1 m 口径光束至几微米光纤的耦合。

试验结果如图 2 所示,结果表明:AO 闭环使信号光斑的 Strehl 比从开环的 <0.02 提高到 0.6,耦合进入单模光纤的信号功率波动从开环的约 30 dB 降低到约 8 dB, AO 校正可以将单模光纤耦合均值功率提高 16 dB。遗憾的是,由于原星载终端并非为几个 Gb/s 的相干通信设计,信号发散角为 1 mrad,地面接收功率较弱导致未取得理想的通信效果。

#### 2.1.2 同步轨道卫星至地链路

美国同步轨道至地的激光通信中继项目由 NASA 戈达德空间飞行中心主导,麻省理工学院林肯实验室

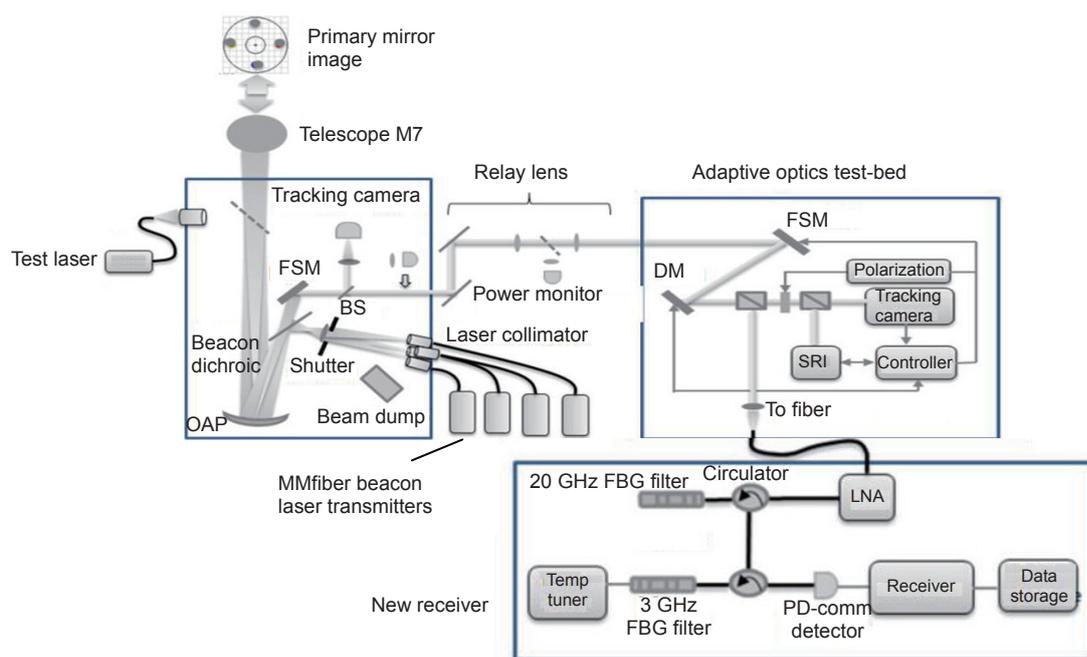


图 1 OPALS 地面站配置波音的 AO 系统原理图<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Schematic of OPALS ground system showing addition of Boeing provided AO system<sup>[15]</sup>

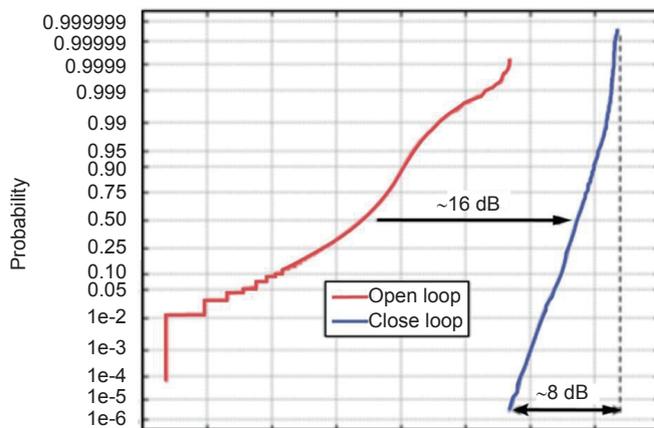


图 2 AO 系统开、闭环时进入光纤光功率概率分布<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Open and closed loop power in fiber probability distribution<sup>[15]</sup>

和 NASA 喷气推进实验室共同参与，旨在瞄准下一代先进卫星通信和数据服务的关键技术验证<sup>[17-18]</sup>。该激光通信终端计划于 2019 年发射，将开展为期 2 年至 5 年的多项通信技术测试，包括编码、测距、链路层协议和网络层协议。该项目的地面站具有几个新特点：1) 多种通信模式，包括 2.88 Gb/s uncoded DPSK 和 1.244 Gb/s coded DPSK 的相干通信模式，以及 311 Mb/s 16-PPM 非相干通信模式，具体参数如表 1 所示；2) 多个地面站同时工作，卫星终端可同时与位于 Table Mountain 的 1 m 口径地面站 OGS1 和夏威夷的

0.6 m 口径地面站 OGS2 进行通信；3) 自适应光学技术抑制大气湍流，两个地面站均研制了自适应光学系统。如图 3 所示，OGS1 地面站库德房平台上包括 4 路信标 1 路信号发射单元 TX arm、捕获单元 Acq 和 AO 系统等，AO 系统采用两级变形镜校正，LODM 和 HODM 分别用于低空间频率大幅值和高空间频率小幅值湍流像差的校正，行程分别为 3.5  $\mu\text{m}$  和 1.5  $\mu\text{m}$ 。波前探测 WFS 为哈特曼传感器，直接对 1545 nm 的下行信号光进行探测(占总能量的 20%)，探测器为 Cheetah InGaAs 相机，采样帧频可达 10 kHz；OGS2

表 1 LCRD 项目主要参数

Table 1 Main parameters of the LCRD project

名称	参数
通信模式	2.88 Gb/s uncoded DPSK
	1.244 Gb/s coded DPSK
	311 Mb/s 16-PPM
下行波长	1545 nm
上行信标波长、发散角及功率	1553 nm, 280 $\mu$ rad and 4 $\times$ 2.5 W
上行信号波长、发散角及功率	1563 nm, 20 $\mu$ rad and 10 W

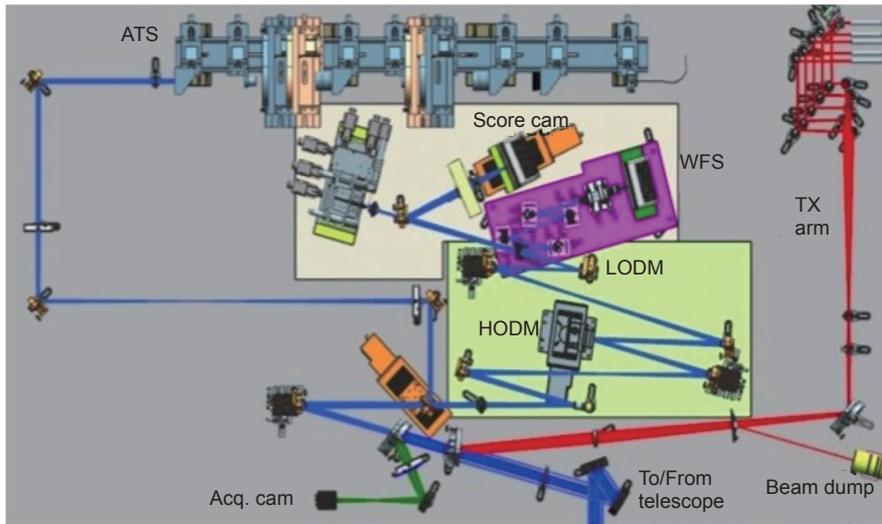


图 3 LCRD 光机布局图<sup>[18]</sup>

Fig. 3 The opto-mechanical layout of the LCRD<sup>[18]</sup>

地面站将配备 140 单元变形镜的自适应光学系统；4) 可白天和夜晚工作。从这些特点可以看出，自适应光学技术成为美国高速率相干激光通信抑制大气湍流的主导技术，而多地面站和自适应光学技术结合将成为应对大气湍流和云雾等恶劣天气的手段。星地激光通信技术已处于工程实用化的前夜，相关技术验证系统从关注链路的短时可通性向高速率和全天时高可用度发展。

## 2.2 欧洲

欧洲的星地激光通信项目以德国航天中心(DLR)和欧洲空间局(ESA)主导的 Alphasat 计划和欧洲数据中继卫星系统为代表<sup>[19-21]</sup>，其激光通信地面站位于西班牙的特纳利夫岛，包括 1 个 26 cm 口径的可移动式地面站和 1 个 1 m 口径的固定式地面站，两个地面站的相干接收均采用自适应光学校正后耦合至单模光纤的方式。

移动式地面站包括一个 26 cm 口径的接收望远镜和 1 个 10 cm 口径的发射望远镜，针对近地轨道或同步轨道应用设计了可调激光发射角功能。2015 年 9 月其与位于同步轨道的 Alphasat 卫星光通信终端进行了多次 1.8 Gb/s BPSK 双向相干通信试验。地面站接收终端示意图如图 4 所示，系统包括一个 26 cm 口径接收望远镜和一个 10 cm 口径发射望远镜，接收望远镜内部主要包括跟踪传感器 AS 和 AO 系统，AO 系统配置了精指向镜 FPM、12  $\times$  12 单元变形镜 DM 和波前传感器 WFS，系统采样频率为 6.7 kHz，闭环带宽为 250 Hz。通过 AO 校正获得近衍射极限的下行信号光斑，从而实现单模光纤耦合，并接入通信端机 RFE。

1 m 口径光通信地面站正在进行 AO 系统配置升级，包括捕获探测器、精指向单元和 468 单元自适应光学系统，可工作在 1064 nm 和 1550 nm 两种波段，其目标是在强湍流  $r_0 = 5$  cm 下实现与近地轨道、同步轨道卫星的相干激光通信。

欧美激光通信地面站采用了不同口径和 AO 结构, 光通信 AO 系统设计是还处在探索阶段, 面临许多新挑战: 1) 高精度高稳定的波前校正, 激光通信 AO 系统校正以单模光纤耦合效率为目标, 高耦合效率需要高精度的波前像差和抖动校正<sup>[12]</sup>。传统天文应用中 AO 系统通常关心校正远场的平均 SR 值。激光通信更关注 AO 校正效果的瞬时和统计特性<sup>[22]</sup>, 由星地链路预算提出耦合效率下限值需求, 进一步得到 AO 系统波前校正远场 SR 最小值要求, 低于 SR 最小值将可能产生误码。2) 激光通信 AO 系统工作湍流条件更恶劣, 主要表现在向全天时工作方向发展; 望远镜跟踪的目标高速运动, 入瞳处将产生较强横向风; 为提高与卫星的通信时间, 望远镜需要工作至 20° 低仰角状态。正是由于激光通信对 AO 系统瞬时校正效果和强湍流工作的要求, 欧美光通信地面站 AO 系统采用了高时间和空间分辨率的校正, 如表 2 所示, 波前采

样频率达到了 10 kHz; 美国 LCRD 的 1 m 口径地面站为了兼顾高的空间分辨率和大行程 (> 3.1 μm) 的校正需求, 采用了两级校正变形镜校正, 高密度变形镜单元数达到了千单元级。

### 3 国内自适应光学光通信地面站进展

国内自适应光学技术的研究以中国科学院自适应光学重点实验室为代表, 具备研发几十单元至千单元 AO 系统能力, 其核心器件倾斜镜、变形镜、波前探测器和实时控制系统可根据任务需求自主设计制造。近年来, 已研制了多套 AO 系统应用于不同规模的激光通信地面站中, 包括 137 单元 AO 系统结合 0.6 m 口径固定式地面站和移动式地面站各一套; 357 单元 AO 系统结合 1.8 m 口径地面一套, 取得了初步的试验结果。

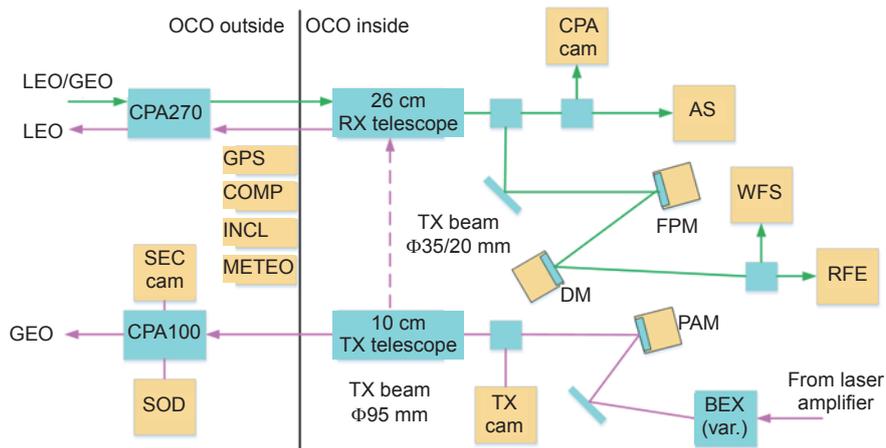


图 4 移动式自适应光学地面站光学原理图<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Optical diagram transportable adaptive optics ground station<sup>[20]</sup>

表 2 典型光通信地面站 AO 系统主要参数

Table 2 Main AO system parameters of the typical optical communication station

	美国 LCRD 地面站	德国 DLR 移动地面站
望远镜口径	1 m	0.26 m
工作湍流条件	$r_0$ 5.2 cm ( $\lambda=500$ nm, 最大天顶角 70°)	$r_0$ 10 cm ( $\lambda=1064$ nm)
工作时段	白天和夜晚	夜晚
单模光纤耦合效率	55%	-
波前探测波长	1545 nm	1064 nm
波前采样频率	10 kHz	6.7 kHz for GEO; 10 kHz for LEO
变形镜单元数	两级校正: 12×12 低密度变形镜和 32×32 高密度变形镜	12×12 变形镜

### 3.1 $\Phi 0.6$ m 光通信地面站及试验

为解决飞机-地、近地/同步卫星-地和地面两个基站间相干激光通信链路大气湍流效应，研发了 137 单元 AO 系统结合 0.6 m 口径固定式的地面站和移动式的地面站各一套。AO 系统原理图、校正器结构和子口径光斑如图 5 所示，系统工作的信标/信号波长为 831 nm/1550 nm，AO 闭环频率为 1600 Hz，探测灵敏度

度为 -60 dBm。

2017 年 4 月在 0.5 km 水平链路对系统进行了 >12 h 的相干通信测试，通信模式为 BPSK 5 Gb/s，同时用大气相干长度测试仪监视了  $r_0$  的变化，在午后大气湍流达到 2 cm ( $\lambda=550$  nm)。整个测试过程中 AO 取得了较好的效果，AO 系统闭环后平均功率为 -42.3 dBm，相比开环增加 7.4 dB，如图 6 所示，AO 闭环后眼图稳定

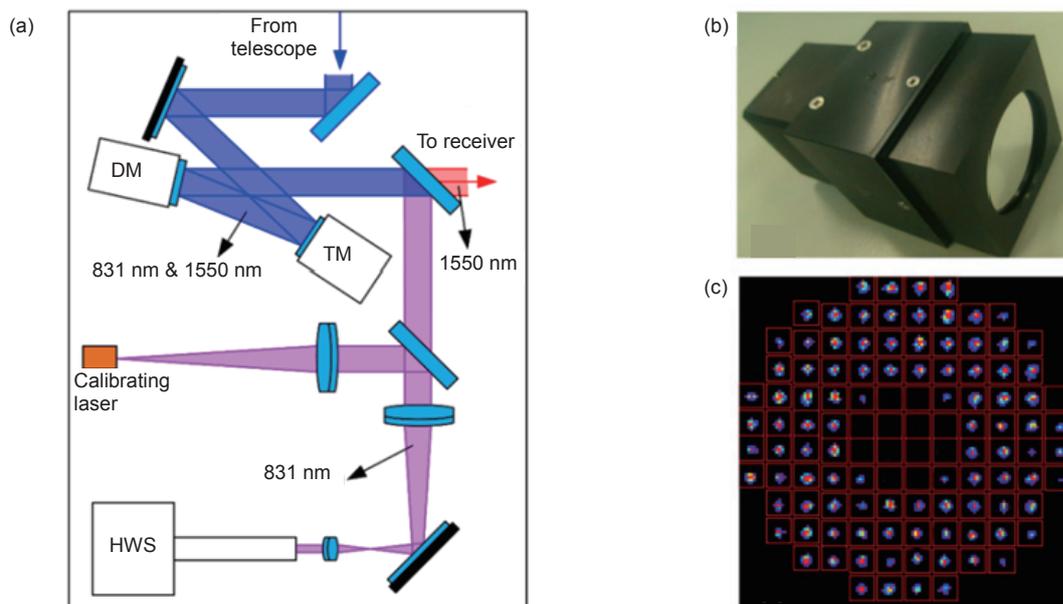


图 5 AO 单元的结构。(a) AO 光路图；(b) 137 单元连续面形变形镜；(c) 波前探测器光斑

Fig. 5 Structure of the experimental AO unit. (a) The light path of the AO unit; (b) Photo of the 137-element continuous surface deformable mirror; (c) Image of the wavefront sensor

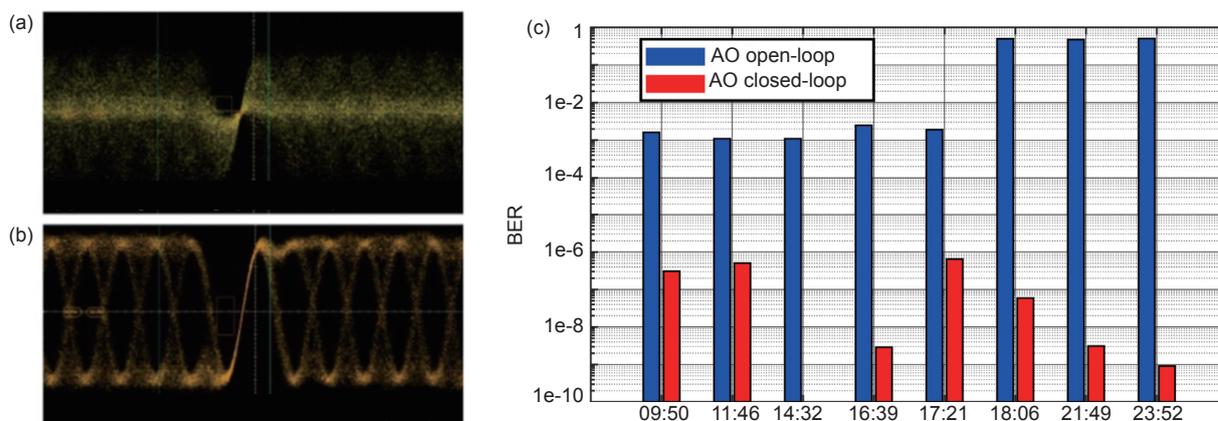


图 6 通信速率 5 Gb/s 下眼图和误码率。(a) AO 开环(09:50 am)；(b) AO 闭环(09:50 am)；(c) AO 开环和闭环误码率

Fig. 6 The eye patterns and BER at 5 Gb/s. (a) Without AO correction (09:50 am); (b) With AO correction (09:50 am); (c) The BER results

张开, 误码率由开环  $10^{-3}$  下降到  $10^{-6}$  以下。

3.2  $\Phi 1.8\text{ m}$  光通信地面站及试验

面向同步轨道-地的激光相干通信和更远距离的

深空光通信, 采用了大口径望远镜和大规模 AO 系统结合的技术路线, 该技术路径可提高接收光功率和光束质量, 降低系统跟踪要求。如图 7 所示, 目前已对高美谷 1.8 m 望远镜配备了 357 单元自适应光学系统,

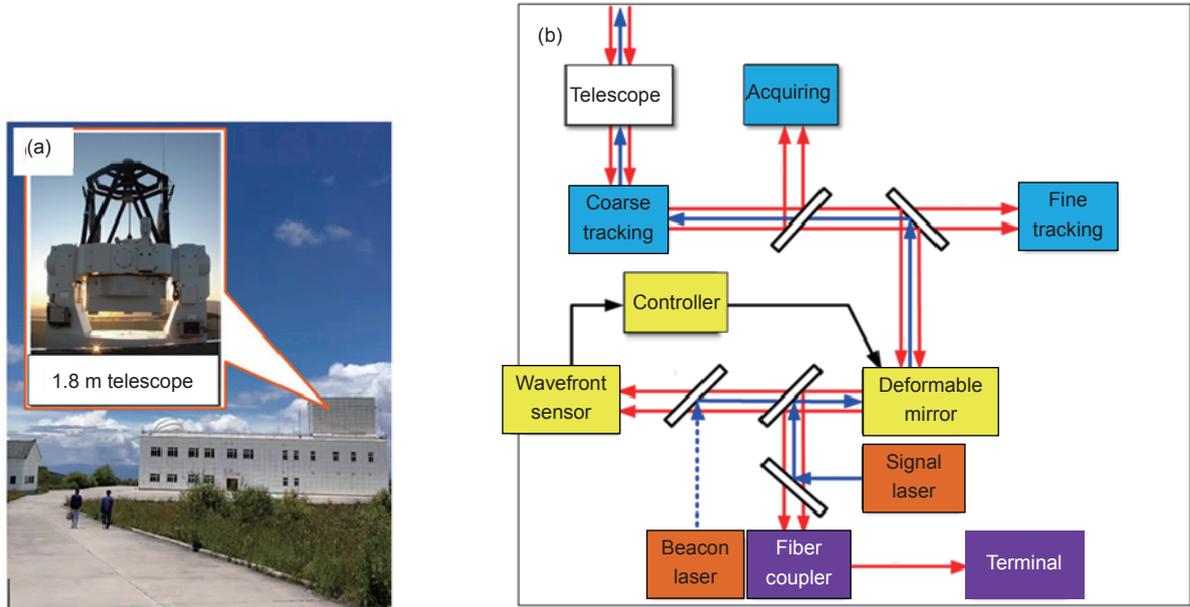


图 7 (a) 1.8 m 地面站照片; (b) 地面站系统原理图

Fig. 7 (a) Picture of the 1.8 m ground station; (b) The schematic of the ground station

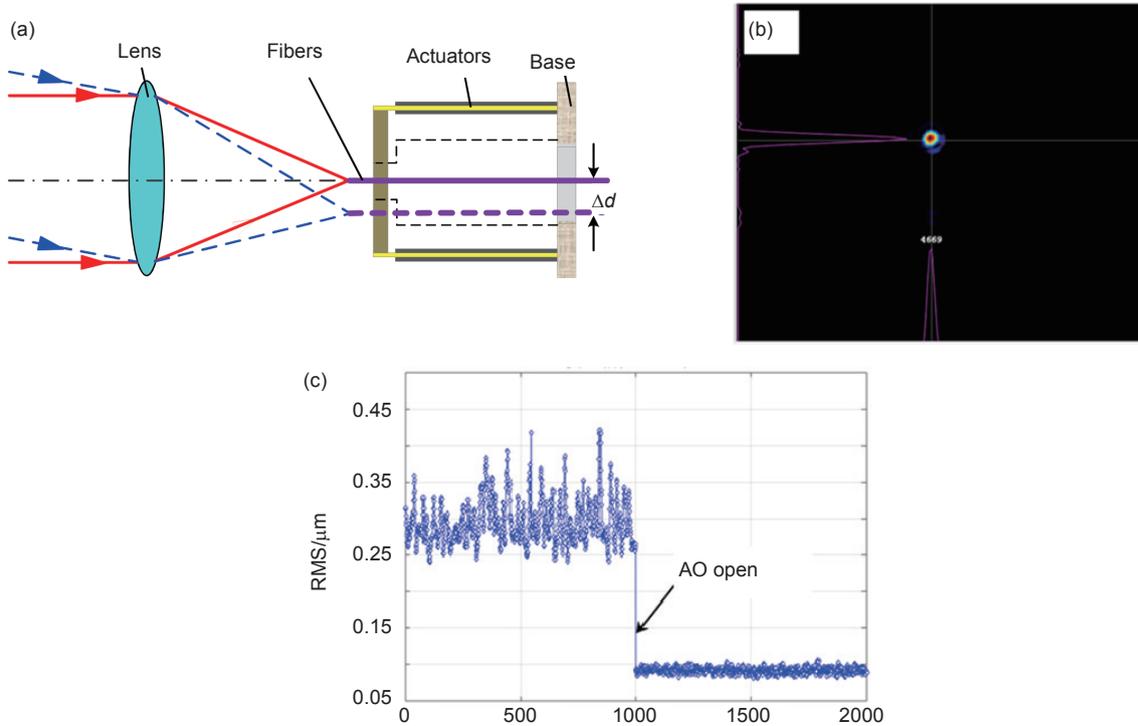


图 8 (a) 自适应光纤耦合器; (b) AO 校正后近衍射极限信号光斑; (c) AO 开启和关闭时波前残差 RMS 值

Fig. 8 (a) Picture of the adaptive fiber coupler; (b) The near diffraction limited RX spot achieved with AO; (c) Residual wavefront RMS with AO on and off

系统的主要功能包括: 1) 自适应光学校正, 在  $r_0 \geq 9$  cm 时实现校正后光束质量  $SR \geq 0.8$ , 校正后波前残差  $< 0.1$   $\mu\text{m}$ , 保证相干通信系统在低高度角强湍流效应下的可用度; 2) 三级跟踪和自适应光纤耦合, 利用自适应光纤耦合器和随机并行梯度下降(stochastic parallel gradient descent, SPGD)算法校正大气湍流中整体倾斜像差<sup>[23]</sup>, 实现了  $< 0.5$   $\mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ) 跟踪精度和  $\geq 30\%$  的单模光纤耦合效率; 3) 多路信号/信标智能共轴技术, 实现  $< 2$   $\mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ) 的同轴度, 相关结果如图 8 所示。

## 4 结 论

1) 自适应光学技术成为美国和欧洲等国正在研制的中继卫星至地光通信系统解决大气湍流效应的主导手段, 但至今只有少数几次 AO 校正的星地通信测试报道, 相关测试结果也是阶段性的。国内已研发了多套不同口径的 AO 地面站, 实现了根据链路特性设计 AO 系统的规模、排布形式和探测校正模块性能, 在较强大气湍流下保证信号光至单模光纤的高效耦合, 相关进展与国外水平保持一致。

2) 国外激光通信中继卫星地面站将进行自适应光学技术、白天和夜晚多地面站接收技术和高速相干通信技术等关键技术验证, 表明星地激光通信正向高速相干和全天时高可用度的工程化推进。

## 参 考 文 献

- [1] Gregory M, Heine F F, Kämpfner H, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(3): 031202.
- [2] Liu C, Chen S Q, Liao Z, et al. Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(10): 2605-2610.  
刘超, 陈善球, 廖周, 等. 自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(10): 2605-2610.
- [3] Sodnik Z, Smit H, Sans M, et al. LLCD operations using the Lunar Lasercom OGS Terminal[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **8971**: 89710W.
- [4] Abrahamson M J, Sindiy O V, Oaida B V, et al. OPALS: mission system operations architecture for an optical communications demonstration on the ISS[C]//*SpaceOps 2014 13th International Conference on Space Operations*, Pasadena, CA, 2014: AIAA-2014-1627.
- [5] John D M, Keith E W. The architecture of the laser communications relay demonstration ground stations: an overview[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8610**: 86100L.
- [6] Cornwell D. NASA's optical communications program for 2017 and beyond[EB/OL]. (2017-10-12). [http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/03\\_don\\_cornwell\\_nasas\\_optical\\_comm\\_program\\_public\\_release\\_june\\_2017.pdf](http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/03_don_cornwell_nasas_optical_comm_program_public_release_june_2017.pdf).
- [7] Seel S, Troendle D, Heine F, et al. Alphasat laser terminal commissioning status aiming to demonstrate GEO-relay for sentinel SAR and optical sensor data[C]//*Proceedings of 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2014: 100-101.
- [8] Böhmer K, Gregory M, Heine F, et al. Laser communication terminals for the European data relay system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8246**: 82460D.
- [9] Wu F, Yu S Y, Ma Z T, et al. Correction of pointing angle deviation and in-orbit validation in satellite-ground laser communication links[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(6): 0605008.  
武凤, 于思源, 马仲甜, 等. 星地激光通信链路瞄准角度偏差修正及在轨验证[J]. *中国激光*, 2014, **41**(6): 0605008.
- [10] 叶瑞优. 星地高速相干激光通信实验完成在轨测试[EB/OL]. (2017-01-20). [http://www.cas.cn/syky/201701/t20170120\\_4589002.shtml](http://www.cas.cn/syky/201701/t20170120_4589002.shtml).
- [11] 齐昊. 马晶谭立英夫妇: 站上卫星激光通信领域世界之巅[EB/OL]. (2017-10-17). <http://www.hlj.gov.cn/ztlz/system/201710/17/010851149.shtml>.
- [12] Chen M, Liu C, Xian H. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling over relatively strong turbulence with adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(29): 8722-8726.
- [13] Liu C, Chen S Q, Li X Y, et al. Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 15554-15563.
- [14] Li M, Gao W B, Cvijetic M. Slant-path coherent free space optical communications over the maritime and terrestrial atmospheres with the use of adaptive optics for beam wavefront correction[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(2): 284-297.
- [15] Wright M W, Kovalik J, Morris J, et al. LEO-to-ground optical communications link using adaptive optics correction on the OPALS downlink[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9739**: 973904.
- [16] Wright M W, Morris J F, Kovalik J M, et al. Adaptive optics correction into single mode fiber for a low Earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(26): 33705-33712.
- [17] Roberts L C, Jr Burruss R, Fregoso S, et al. The adaptive optics and transmit system for NASA's laser communications relay demonstration project[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9979**: 997901.
- [18] Roberts W T, Antsos D, Croonquist A, et al. Overview of ground station 1 of the NASA space communications and navigation program[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9739**: 97390B.
- [19] Saucke K, Seiter C, Heine F, et al. The Tesat transportable adaptive optical ground station[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9739**: 973906.
- [20] Fischer E, Berkefeld T, Feriencik M, et al. Use of adaptive optics in ground stations for high data rate satellite-to-ground links[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10562**: 105623L.
- [21] Heine F, Saucke K, Troendle D, et al. Laser based bi-directional Gbit ground links with the Tesat transportable adaptive optical ground station[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10096**: 100960Y.
- [22] Védrenne N, Conan J M, Petit C, et al. Adaptive optics for high data rate satellite to ground laser link[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9739**: 97390E.
- [23] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 602-609.  
李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于光纤耦合器的全光纤链路锁相控制[J]. *光电工程*, 2017, **44**(6): 602-609.

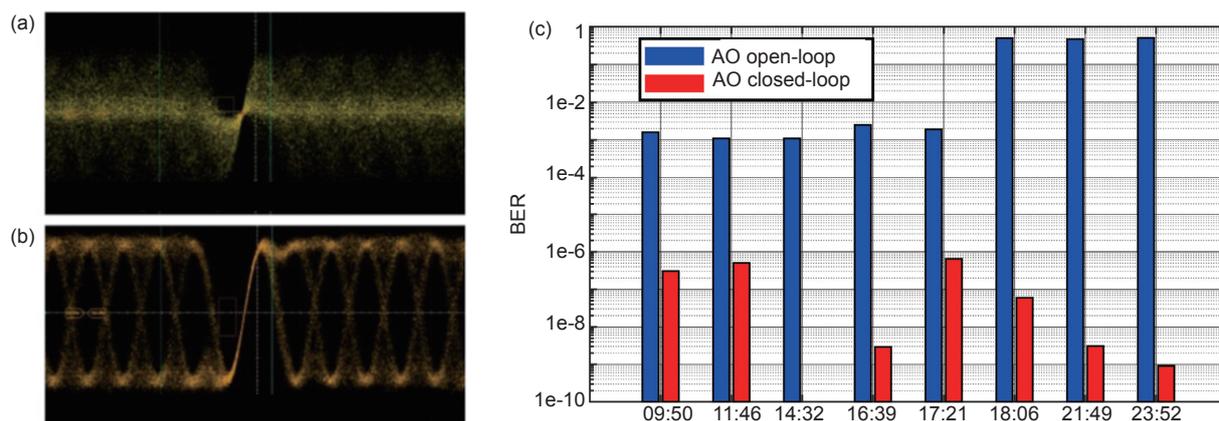
# Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station

Rui Daoman<sup>1,2</sup>, Liu Chao<sup>1,2\*</sup>, Chen Mo<sup>1,2,3</sup>, Xian Hao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



The eye patterns and BER at 5 Gb/s. (a) Without AO correction (09:50 am); (b) With AO correction (09:50 am); (c) The BER results

**Overview:** The advance of satellite to ground laser communication station using adaptive optics (AO) is summarized. Adaptive optics is the dominant technology to solve the atmosphere induced coherence degradation and availability reduction in the America and Europe researching relay satellites. Key technologies, such as adaptive optics, multi-ground station receiving in day and night, and coherent communication are planned to test in these projects. It indicates that the satellite to ground laser communication is advancing to the engineering application with high data rate coherence and round-the-clock high availability. According to these system designs, it can be found that the laser communication AO system has many new challenges over the astronomical AO system, such as day and night wavefront correction, high fiber coupling efficiency, high velocity and low elevation angle tracking. Meanwhile, the laser communication AO system needs to pay more attention on the instantaneous and statistical property of the corrected facula strehl ratio (SR) because of the high data rate. For these reasons, high spatial resolution deformable mirror (DM) and close loop bandwidth are required for the laser communication AO system. Two deformable mirrors with actuators 12×12 and 32×32 are used for low and high spatial resolution correction in the America laser communication relay demonstration (LCRD) project, and the wavefront sensor frame rate is about 10 kHz. The AO system can provide high precision tracking and wavefront correction for more than 50% fiber coupling efficiency at the elevation angle of 20°.

Several satellite to ground laser communication experiments have been successfully carried out in domestic, and the high availability coherent laser communication test is in progress. Adaptive optics technology has been applied in several ground stations in the key laboratory on adaptive optics of Chinese Academy of Sciences. A  $\Phi 0.6$  m telescope with 145 actuators AO and a  $\Phi 1.8$  m telescope with 357 actuators AO for laser communication have been established. Free space coherent laser communication has been carried out using the  $\Phi 0.6$  m ground station in a  $>0.5$  km horizontal link and pretty results are obtained in the preliminary experiment. The results show that the mean fiber coupling power is about -42.3 dBm when the AO is closed, and 7.4 dB power gain is obtained compared with the AO open loop. The communication bit error decreases from  $10^{-3}$  to  $10^{-6}$  and the eye patterns are open when the AO is closed. The coherent laser communication system with AO can achieve low bit error ( $<10^{-6}$ ) and high data rate ( $>5$  Gb/s) in the moderate atmospheric turbulence.

**Citation:** Rui D M, Liu C, Chen M, *et al.* Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170647

Supported by Chinese Academy of Sciences Innovation Fund(CXJJ-16S021)

\* E-mail: liuchao678@163.com